

構造物診断のための IoT 最先端通信技術 (LPWA) 導入に向けた調査研究

大阪大学 正会員 ○小泉 圭吾
地球観測(株) 非会員 福田 芳雄
(一財) 関西情報センター 非会員 澤田 雅彦

1. 目的

社会インフラの老朽に伴う構造物健全度診断は喫緊の課題となっている。特に橋梁、トンネルは、道路法施行規則の一部改正により、5年に一度、近接目視による全数監視、診断結果の記録・保存、更に統一的な尺度で健全性の診断結果を分類することが義務付けられた。一方、全橋梁の72%は点検者が不足している市町村道に当たり、一部の構造物では既に老朽化による変状が顕在化している。従って、市町村道においては、広範囲に点在する構造物を低コストで効率的に点検できる仕組みが必要不可欠となっている。そこで本研究では最新の IoT 技術として注目されている LPWA に着目し、近接目視に代わる新たな点検支援システム構築のための調査研究を行うこととした。なお本研究は(一財)関西情報センター・スマートインフラセンサ利用研究会(座長:大阪大学大学院 矢吹信喜教授)による研究成果の一部をとり纏めたものである。

2. 研究手順

本研究では現在入手可能な LPWA 用無線モジュールを選定し、それらを実装したハードウェアおよびデータ閲覧のための WEB 観測システムを開発した。具体的には、事業者が主体となって通信網を整備している LoRaWAN および Sigfox デバイスを利用したシステム、利用者が主体となって通信網が構築できる LoRaWAN および ZETA デバイスを利用した計 4 システムである。次に開発した 4 システムを用いて屋外での通信試験を行い、それぞれの通信の特徴および有用性を評価した。

3. 通信試験結果

ここでは上述した 4 種類の LPWA を用いて通信試験を行った。LPWA は周波数帯域がサブギガ帯 (920MHz 帯) のため、従来のワイヤレスセンサネットワークで使用されている 2.4GHz 帯 (IEEE 802.15.4) に比べるとフレネルゾーンが広い。この特性を生かすために、基地局は通常ビルの屋上などアンテナ高さを稼げる位置に設置することで通信距離を確保している。一方、インフラ管理者がセキュリティの観点から独自に基地局を設置しようとした場合、或いは通信サービス事業者による基地局エリアの圏外でシステムを構築したい場合等、事業者自らが基地局を設置する場合も想定される。このようなケースでは、ビル屋上などの高所に基地局を設置できない場合も考えられることから、基地局を低所に設置した場合の通信環境を把握することは実務を想定する上では必要不可欠である。そこで基地局を独自に設置できるソラコム製 LoRaWAN デバイスとテクサー製 ZETA については、基地局を地上 1.5m 付近に設置して通信試験を行うこととした。試験実施場所は大阪府東大阪市にある春宮跨道橋周辺とした。開発した 4 システムの通信試験の結果、次に示す特徴を確認することができた (図 1)。

- 1) 事業者が通信網を構築する LoRaWAN システム (NTT 西日本グループ) では、基地局がビル屋上に設置されていることもあり、基地局から 1.5km 圏内であれば見通しの有無に関わらず地上付近の子局との通信が可能であることが確認された (図1左上)。
- 2) 事業者が通信網を構築する Sigfox システム (京セラコミュニケーションシステム) では、提供されているカバレッジ圏内であれば通信環境は比較的良好であることが確認された (図1右上)。
- 3) 利用者が独自に通信網を構築できる LoRaWAN システム (SORACOM) では基地局を地上 1.5m と低い位置に設置したこともあり、見通しが通信距離に影響することが分かった。一方、このような環境下でも 0.6~1km 程度の通信が可能であることが確認された (図1左下)。
- 4) 利用者が独自に通信網を構築できる ZETA システム (TECHSOR) では基地を地上 1.5m と低い位置に設置したものの、中継器が利用できる特徴を使って通信距離等の問題を解決できることが確認された (図1右下)。

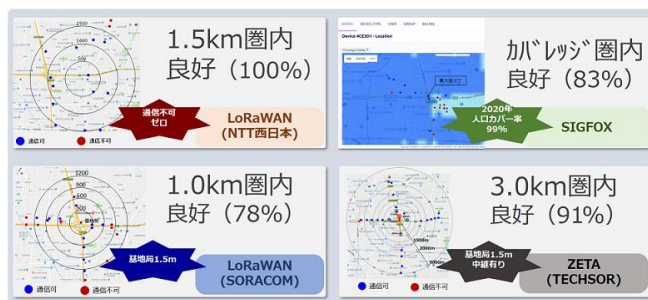


図 1 本研究で用いた LPWA の通信試験結果

キーワード 構造物診断, IoT, LPWA, 機械学習

連絡先 〒540-6305 大阪市中央区城見 1-3-7 松下 IMP ビル 5F (一財)関西情報センター TEL:06-6809-2142

4. 構造物診断のための LPWA の利活用方法

本研究では構造物診断を目的に、大阪府東大阪市にある春宮跨道橋の橋桁に亀裂変位計（東京測器研究所製、KG-2A）を設置し、LPWA を利用した試験計測を実施した。ここでは本計測に用いた亀裂変位計を使った構造物モニタリング手法について検討してみる。対象は PC 橋梁主桁支間中央部にクラックが発生したと仮定し、その開口幅が進展しているかどうかの診断を行うこととする。コンクリート構造物は日射の影響を受け僅かながらも日々膨張収縮を繰り返していることが一般的に知られている。この直接的な要因は気温変動によるものであるが、コンクリートの場合、熱伝導率の影響により膨張するタイミングと気温が高くなるタイミングは必ずしも一致するわけではなく、むしろ空気に対して熱の伝わり方が遅いため、膨張は時間遅れで発生するものと予想される。図 2 は 3 日間（8/12-8/14）の計測結果を抜き出した亀裂変位と温度（T&D 社製、TR-42）の時系列変化を示している。サンプリング間隔は各 10 分である。このグラフより、温度は日中ピークを迎えるのに対して、亀裂変位の最大値は深夜から明け方に発現していることからこの時間遅れの影響により、両者の関係は概ね逆相関しているように見える。計測期間を約 2 週間に広げて両者の関係性を評価したところ、図 3 に示すような負の相関が確認された。そこでこの関係をモデル化し、現地の温度センサから推定される亀裂変位が健全な状態であると判断することで、亀裂変位の進展をいち早く検出する手法を検討する。モデル化の手法は多岐にわたるがここでは一例として、線形近似法と機械学習法の 1 つであるランダムフォレスト（以下、RF とする）を用いた。使用したデータは図 3 に示す現地で計測された 10 分毎の計測値、合計 1464 データとし、線形近似法ではグラフに示した近似式を用いた。また機械学習法では、温度と温度の時間変化、さらにその差分値を入力データとし、1464 データを用いて亀裂変位との関係をモデル化した。図 4、図 5 は計測データ、線形近似および RF における推定値を示している。計測データと各推定値の平均絶対誤差（MAE）は線形近似法が 0.0027 に対して RF は 0.0013 となり、RF の方が計測データとの整合性が高いことがわかる。そこでこの関係を基に、図 6 のような亀裂変位の進展に対する健全度指標を提案する。この指標は温度と亀裂変位の関係をモデル化し、現地の温度センサから推定される亀裂変位が健全な状態（=0mm）であると判断することで、実際の亀裂変位の進展をいち早く検出するための指標である。今回はわずか 2 週間程度のデータを用いて試験的に評価方法について検討を行ったが、引き続き健全な状態での温度と亀裂変位のデータを蓄積し学習させることで、汎用性を持ったモデルを構築できるものと推察される。

5. まとめ

本研究では最新の IoT 技術として注目されている LPWA に着目し、その通信距離性能を評価した。また構造物診断のための LPWA の利活用方法についても検討を行った。今後これらの成果は点検者不足に悩む自治体への支援ツールの 1 つとして改良していく予定である。

謝辞：本研究は（一財）日本建設情報総合センター（JACIC）の研究助成（助成番号第 2017-05 号）によって行われた。ここに記して深甚の謝意を表する。

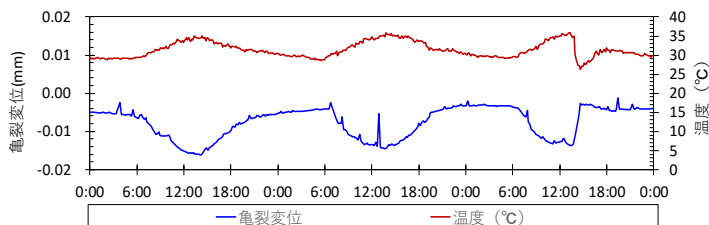


図 2 亀裂変位と温度の時系列変化

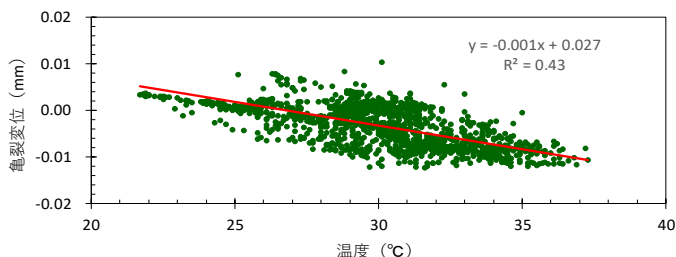


図 3 温度と亀裂変位の関係

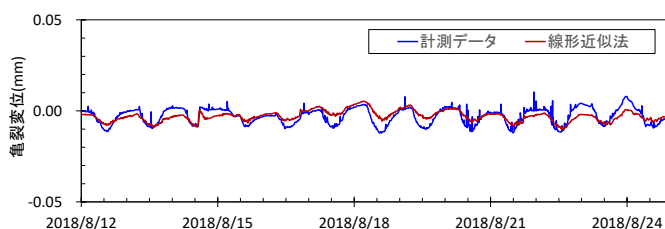


図 4 線形近似法による推定結果

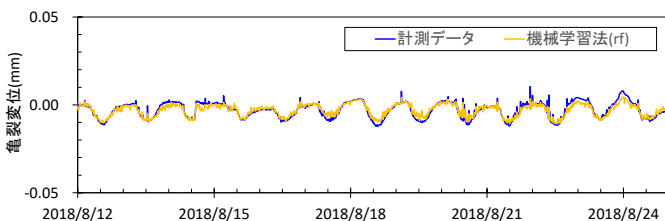


図 5 RF による推定結果

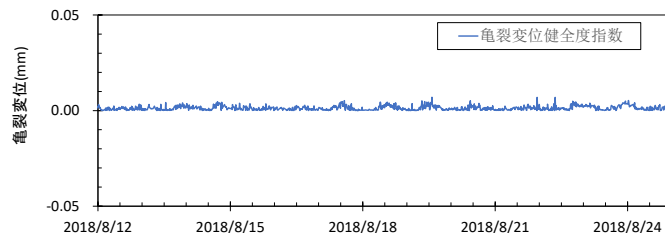


図 6 MAE による推定手法の評価